

コリニアレーザー分光のためのイオンビーム荷電変換装置の開発

著者	浅河 拓光
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	61
ページ	1-5
発行年	2020-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00022916

コリニアレーザー分光のためのイオンビーム 荷電変換装置の開発

DEVELOPMENT OF ION BEAM CHARGE TRANSFER APPARATUS FOR COLLINEAR LASER SPECTROSCOPY

浅河拓光

Takumi ASAKAWA

指導教員 松尾由賀利

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻修士課程

The final goal of this study is to elucidate the nuclear structure by using collinear laser spectroscopy for the ion beam of unstable nuclei generated from an accelerator. In this study, we aimed to neutralize Rb ions with a neutralizer apparatus which utilizes an electron plasma, and tried collinear laser spectroscopy for the neutralized Rb atomic beams. In addition, we evaluated the charge transfer rate for Zr multiply charged ions using alkali gasses.

Key Words : *Collinear laser spectroscopy, Rb ions, charge transfer apparatus.*

1. 研究背景

我々の研究グループ（RICO : RIKEN Collinear laser spectroscopy）では、加速器で生成された不安定核のイオンビームに対し、コリニアレーザー分光法を用いることによって原子核の構造を解明する研究を行っている。コリニアレーザー分光とは、レーザーと同軸上にイオンビームないしは原子ビームを走らせることでドップラー広がりを抑制して高分解能化を実現するレーザー分光法であり^[1]、レーザーとビームで構成されているため、数ある分光法の中で比較的簡単な手法であり、最近のレビュー論文^[2]にも見られるように、多くの元素にコリニアレーザー分光法を適用することができる。

この手法では、イオンビームの加速による速度バンチングを利用してドップラー幅を狭窄し、イオンないしは原子からのレーザー誘起蛍光（Laser Induced Fluorescence 以下：LIF）を観測して原子スペクトルを高精度に測定することで、超微細構造間隔や同位体シフトを決定することが可能となる。超微細構造間隔を測定することで原子核の核構造を反映する物理量である核磁気モーメントと核スピンを導出することができ、同位体シフトから荷電半径を測定することで原子核の大きさや

形を知ることができる。

2. 研究目的

我々の研究グループでは、CERN の ISOLDE 施設^[3]に代表される ISOL 法を用いた従来の低速不安定核ビーム装置では得ることが難しい元素の不安定核の分光を主たる目標に掲げている。加速器からの重イオンビームをターゲットに入射し入射核破砕反応や核分裂反応で生成する不安定核ビームは核子あたり 100-300 MeV 程度のエネルギーを持っており、かつ原子核の束縛エネルギーに起因する 10 MeV 程度のエネルギー広がりがあり、そのままではレーザー分光などの原子分光を行うことは難しい。そこで、そういった不安定核ビームを停止・熱化させ、低エミッタンスの低速不安定核ビームとして引き出す SLOWRI 施設の建設が進められている。SLOWRI 施設では、150 Torr 程度の He ガスで満たされた長さ 1500 mm のガスセル内で不安定核を熱化させる。ここで、He のイオン化ポテンシャルが高いために、入射イオンのかなりの割合がイオンの状態で熱化する。RICO グループで最重要ターゲットとしている元素として Zr 同位体や Nb 同位体が挙げられるが、これらの元素はそれぞれ第三・

第二イオン化ポテンシャルが He の第一イオン化ポテンシャルよりも低く、2+や 3+といった多価イオンのままガスセルから引き出される可能性が高いと見積もられ、そのままではレーザー分光の実施が難しいという問題がある。本研究の目的は、これら多価イオンを一価イオンないし中性化する装置を開発することである。

本研究では電子プラズマを利用した中性化装置がこの用途のために有用かを調査するために、オフライン試験にて、Rb 表面電離イオン源を用いて Rb イオンを生成し、中性化装置で中性化、コリニアレーザー分光を行うことを目的とした。また、中性化の別のアプローチとしてアルカリ元素ガスとの衝突による荷電変換が考えられる。この論文ではアルカリ元素ガスとして Na を例にとり、荷電変換レートを見積もったため、これを報告する。

3. 測定装置

(1) 中性化装置

本実験で用いる中性化装置を Fig.1 (写真右手前) に示す。今回用いるのはオメガトロン製のニュートライザー (M4C-00) で、中性化方式として球状電子雲電荷交換型となっている。フィラメントから電子を放出させ電子プラズマを生成し、そこに入射したイオンが中性化する仕組みである。

この中性化装置は、フィラメントおよびバイアス電圧 V_B とフィラメント電流 I_F の2つのパラメータを変えることができる。バイアス電圧 V_B には負の電位を印可する設計になっている。また、フィラメント電流 I_F はフィラメントに流す電流を表しており、これが実際に放出される電流 (放出電流 I_E) に影響している。フィラメントから電子が放出されると電流が流れ込み、負の電流として放出電流 I_E に表示される。フィラメント電流 I_F と放出電流の絶対値 $|I_E|$ の関係を Fig.2 に示す。

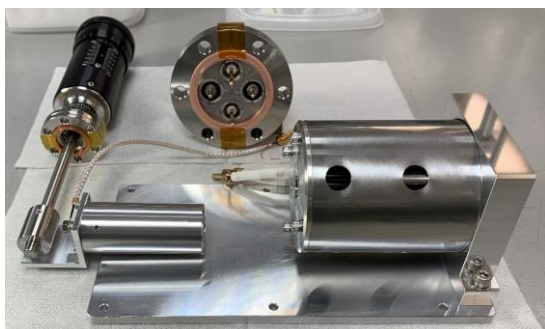


Fig.1 中性化装置の外観

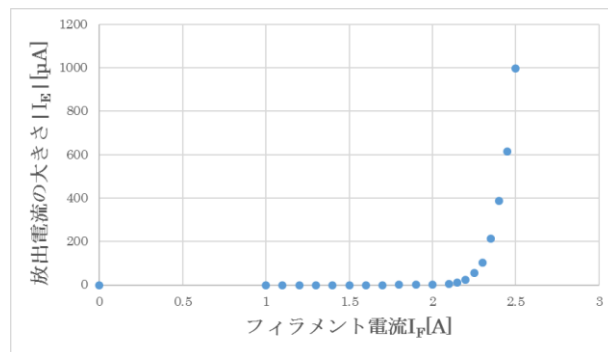


Fig.2 フィラメント電流 I_F と放出電流 I_E の関係

(2) ファラデーカップ

ファラデーカップとは、帯電した粒子を真空中で捕捉し、荷電粒子や電子の量を検出する際に用いられる装置のことである (Fig.1 写真左手前)。ファラデーカップは金属でできており、そこにイオンや電子などの電荷をもった荷電粒子が入射すると、金属に電荷がたまる。この時ファラデーカップに電流計をつないでみると、電流計には入射した荷電粒子の数に応じた電流が流れる。この原理を利用し、ファラデーカップに流れ込む電流を測定することで、ファラデーカップに入射した単位時間における荷電粒子数を算出することができる。

連続的な 1 価のイオンビームの場合、電流計で測定された電流値を I 、電気素量 (約 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$) を e とすると、ファラデーカップに入射した荷電粒子数の単位時間当たりの数 N は次式で表される。

$$N = I/e \quad (1)$$

本実験ではファラデーカップを真空用直線導入機に取り付けることによって中性化装置でファラデーカップの出し入れを可能にし、ビームの中性化計測を行った直後に下流の分光観測領域へ照射することを可能とした。

4. ファラデーカップを用いた中性化装置の性能評価

(1) 実験方法

Fig.3 のように Rb 表面電離イオン源から出た Rb イオンを中性化装置まで輸送する。中性化装置通過後にファラデーカップを置き、中性化装置を ON, OFF した時のそれぞれのイオン数を計数する。中性化装置で生成され

た電子プラズマによってイオンが中性化されているのならば、中性化装置を ON にした時にファラデーカップで測定される電流値は中性化された量に応じて小さくなるはずである。

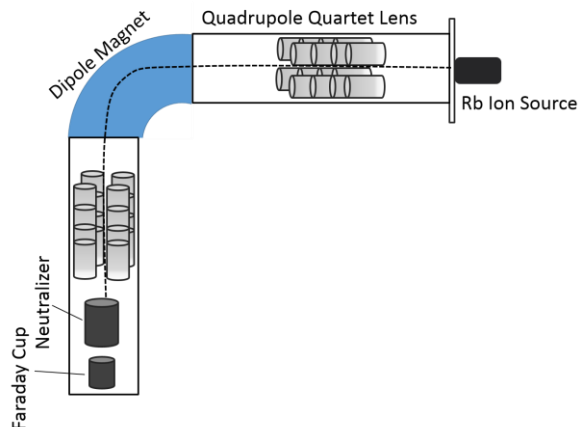


Fig.3 実験セットアップ

（２）実験結果

ファラデーカップで計測したイオンビーム量の減少量から求めた中性化されたイオンの量を用いて、中性化効率を求めると、放出電流 I_E との関係は Fig.4 のようになった。

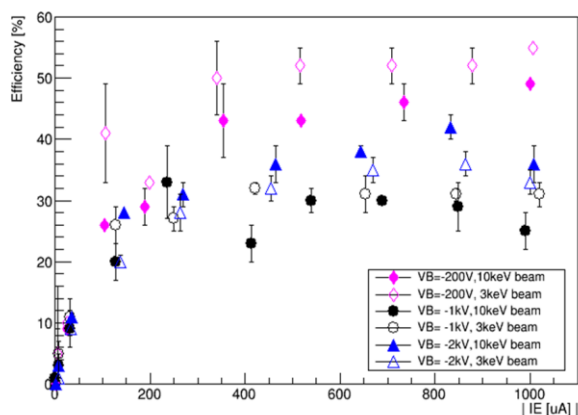


Fig.4 放出電流 I_E と中性化効率の関係

Fig.4 では中性化装置バイアス電圧 V_B 、ビームエネルギー E_B 、の2つのパラメータをそれぞれ変えている。この図から、バイアス電圧 $V_B=-200$ Vの時、最大の中性化効率50 %が見込まれることがわかる。

上記の結果から、中性化装置によって、Rb イオンビー

ムが最大 50%程中性化されたのではないかと考察された。したがって次に、実際にレーザー分光を行い、本当にイオンビームが中性化されているのかどうかを調べた。

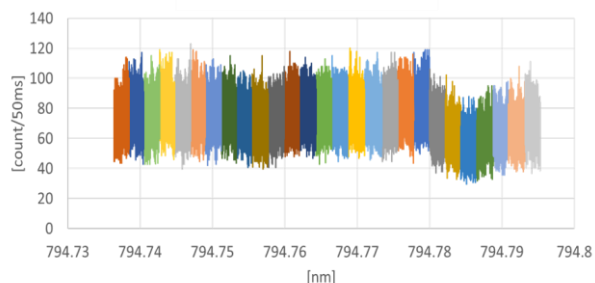


Fig.5 波長掃引によって得られたスペクトル

Fig.5 に実際にレーザー分光によって得られたスペクトルを示す。今回の実験では $^{85,87}\text{Rb}$ 原子の D1 線遷移(3 keV 原子ビームに対するコリニア配置に対し 794.774 nm)に相当する共鳴ピークは観測されなかった。今回の中性化試験では、放射性再結合よりもむしろ $\text{Rb}^+ + \text{e}^- + \text{e}^- \rightarrow \text{Rb}^* + \text{e}^-$ という三体再結合が起こったことで Rb のほとんどが励起状態にいるために基底状態からの励起である D1 遷移を観測することができなかったのではないかと考えた。

5. アルカリ原子ガスを用いた荷電変換レートの見積もり

前章では、イオンビームの中性化方法として、電子プラズマとの衝突による再結合を考え、その実験結果を示した。イオンを中性化させる方法としては他にも、イオンビームをアルカリ原子ガスとの衝突によって荷電変換させることによって中性化させるものがあり、コリニアレーザー分光法ではレーザー分光のために中性原子が必要な際に、イオンビームを中性化させるために広く使われている手法である。ここでは我々が最重要ターゲットとしている Zr 同位体に対し、Zr 多価イオンの荷電変換にこの手法を使えるかどうか調査するため、Zr イオンとアルカリ原子である Na 原子の荷電変換レートを見積もったため、その結果を記述する。

まず Fig.6 は、イオン化ポテンシャル (IP) が 5.14 eV である Na 原子との荷電変換における、相手イオン(10 keV イオンビーム)の IP と中性化断面積の関係を表した

ものである。この図を見てわかるように、イオン化ポテンシャルが Na 原子と同程度の時、中性化断面積が最大となり、そこから離れるにしたがって断面積は著しく小さくなる。

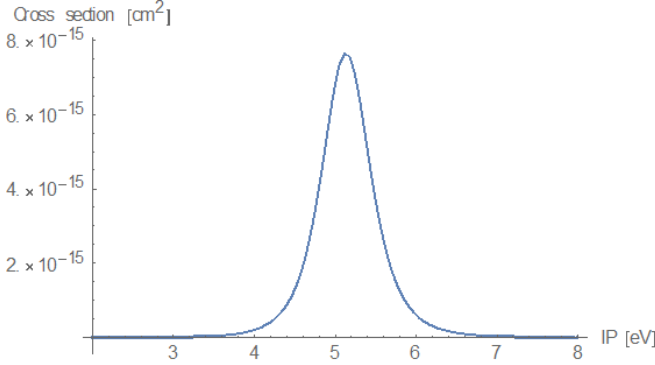


Fig.6 Na 原子 (IP=5.14 eV) との荷電変換における、相手イオンの IP と断面積の関係

Na 原子から電子を 1 つ受け取った Zr^{3+} イオンは Zr^{2+} イオンとなり、各準位に入った電子はその後、有限の時間をもってより下位の準位に脱励起（自然放出）する。

励起状態の原子の個数を N とすると、励起状態の原子一つ一つが各時刻に一定の割合で脱励起するとして、単位時間あたりに減少する励起原子の個数は、励起原子の数に比例するから、

$$\frac{dN}{dt}(t) = -A_{2,1}N(t) \quad (2)$$

と表せる。ここで、 $A_{2,1}$ はアインシュタインの A 係数と呼ばれ、一つの励起原子に対する自然放出の頻度を表している（単位は[時間]⁻¹）。(2)式を、 Zr^{3+} から Zr^{2+} への荷電変換および Zr^{2+} の自然放出すべてを考え拡張すると次のレート方程式が考えられる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{2,1} & \cdots & \alpha_{n,1} \\ \alpha_{1,2} & \alpha_{2,2} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{1,n} & \cdots & \cdots & \alpha_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、添え字の数が小さいほど上位状態とし、 α は遷移確率とする。 N_1 を Zr^{3+} の基底状態にいる確率、 $N_2 \sim N_{97}$ を Zr^{2+} の今回関係する準位(96 準位)にいる確率とし、今回時刻 $t=0$ において Zr^{3+} である確率を 1、すなわち $N_1 = 1$ としたとき式(3)を数値計算で解いた。 Zr^{2+} の基

底準位から 4 つめまでの準位における存在確率の時間変化図を Fig.7 に示す。また、Fig.7 から Zr^{2+} の基底状態に関してのみ取り出したものを Fig.8 に示す。これらの結果から、 Zr^{3+} から Zr^{2+} に荷電変換された原子のうち、約 15% が基底状態へと脱励起すると予想される。また、その 15% の脱励起までにおよそ 0.06 秒の時間を要することも見取れる。

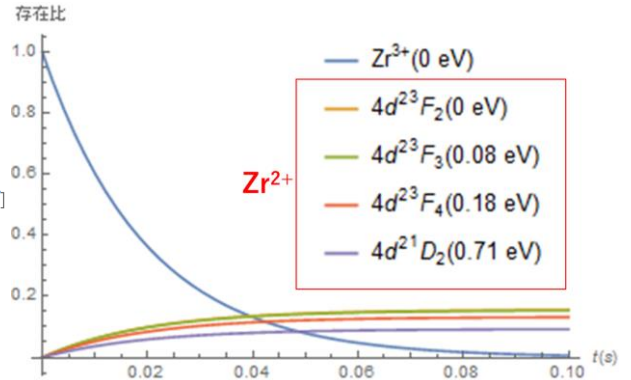


Fig.7 時間変化による存在比の推移

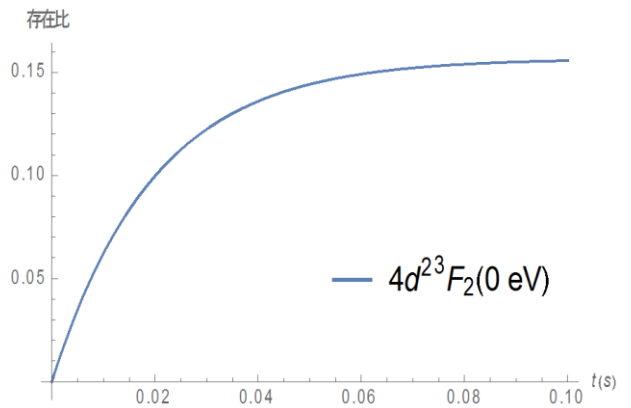


Fig.8 Zr^{2+} の基底状態における存在比の推移

6. まとめと今後の展望

本研究における最終目標は、加速器から生成される不安定核のイオンビームに対し、コリニアレーザー分光を用いることによって、希少不安定原子核の構造を解明する事である。しかし、レーザー分光には適切な価数や中性原子を用意する必要があり、そのための荷電変換装置の試験や見積もりを本研究で行った。

まずは電子プラズマを利用した中性化装置の中性化試験から着手した。3 keV/10 keV Rb イオンビームを使用した結果、最大で約 50% の中性化効率が見込まれることが分かった。しかし、実際に Rb 原子ビームに対し、コリニアレーザー分光を行ったところ、共鳴ピークを確認す

ることができなかった。これは、中性化後の Rb 原子のエネルギー準位がほぼ基底状態にないことを示しているのではないかと考えられる。

また、中性化の別のアプローチとしてアルカリ元素ガスとの衝突による荷電変換が考えられる。本研究ではアルカリ元素ガスに Na を例にとり、 Zr^{3+} から Zr^{2+} への荷電変換レートを見積もった。結果、荷電変換された Zr^{3+} のうち、約 15% が Zr^{2+} の基底状態へと脱励起していることがわかった。また、その 15% の脱励起までにおよそ 0.06 秒の時間を要することも判明した。これは数 keV のイオンビームに対しては尋常な長さの荷電変換セルを用意することが必要であることが示唆されるため、今後の展望として、むしろイオントラップ中で荷電変換させた後、加速させる機構を採るべきであると結論づけた。

参考文献

- 1) E. W. Otten, "Investigation of Short-Lived Isotopes by Laser Spectroscopy", Harwood Academic Pub., 1989.
- 2) P. Campbell et al., Prog. Part. Nucl. Phys. **86**, 127 (2016).
- 3) R. Catherall et al., J. Phys. G **44**, 094002 (2017).